

University of Groningen

Production of radioactive beams for atomic trapping

Traykov, Emil

IMPORTANT NOTE: You are advised to consult the publisher's version (publisher's PDF) if you wish to cite from it. Please check the document version below.

Document Version

Publisher's PDF, also known as Version of record

Publication date:

2006

[Link to publication in University of Groningen/UMCG research database](#)

Citation for published version (APA):

Traykov, E. (2006). *Production of radioactive beams for atomic trapping*. s.n.

Copyright

Other than for strictly personal use, it is not permitted to download or to forward/distribute the text or part of it without the consent of the author(s) and/or copyright holder(s), unless the work is under an open content license (like Creative Commons).

The publication may also be distributed here under the terms of Article 25fa of the Dutch Copyright Act, indicated by the "Taverne" license. More information can be found on the University of Groningen website: <https://www.rug.nl/library/open-access/self-archiving-pure/taverne-amendment>.

Take-down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

Downloaded from the University of Groningen/UMCG research database (Pure): <http://www.rug.nl/research/portal>. For technical reasons the number of authors shown on this cover page is limited to 10 maximum.

Nederlandse samenvatting

Dit proefschrift introduceert de wetenschappelijke doelstellingen van de TRI μ P groep [Wil99, Tur00, Jun02, Wil03, Jun05A, Wil05] en beschrijft het ontwerp, bouwen en ingebruikname van de voornaamste onderdelen van de faciliteit. TRI μ P is gebouwd voor precisiemetingen aan ingevangen radioactieve atomen. De faciliteit biedt een grote variatie aan zuivere radioactieve bundels. Deze werden al benut bij experimenten, waar ionen in een materiaal werden geïmplaneerd. In de nabije toekomst biedt de faciliteit lage energiebundels van kortlevende deeltjes voor experimenten waarbij vertraging, bundelkoeling en atoom vangst nodig zijn.

1. Het Standaard Model en verder

De huidige theorie die het best inzicht geeft in de fysische wereld, is het Standaard Model [Wei95]. In de laatste decennia is het uitgegroeid tot de leidende theorie voor de fundamentele natuurkunde. Voorspellingen van het Standaard Model zijn bevestigd door nagenoeg alle experimenten die deze theorie testen. Afwijkingen tussen theorie en enkele van de experimenten bleken niet echt of konden later in de theorie opgenomen worden door toevoeging van vrije parameters. Ondanks de successen van het Standaard Model zijn er verscheidene theoretische en experimentele indicaties voor fysica waar het Standaard Model niet voldoet. Voorbeelden zijn de aanwezigheid van “donkere materie” in het universum en de relatief geringe rol van anti-materie in het verloop van de “Big Bang”.

Verscheidene speculatieve modellen zijn voorgesteld als uitbreiding op het Standaard Model om de onopgeloste waarnemingen te kunnen verklaren. De parameterruimte van deze modellen is beperkt, waardoor het mogelijk is ze experimenteel te testen. Door de experimentele resultaten worden de toepassingsmogelijkheden van veel modellen sterk beïnvloed. Voor het experimenteel testen van deze modellen en het zoeken naar fysische verschijnselen die verder gaan dan het Standaard Model, worden twee verschillende benaderingen toegepast. De

eerste manier is door het direct zoeken naar voorspelde materie of verschijnselen bij zeer hoge energieën. De tweede methode is gebaseerd op precieze metingen en richt zich op kleine verschillen tussen de experimentele resultaten en de theoretisch voorspelde verwachting. Het TRI μ P programma berust op de laatste benadering, met als voornaamste doel het meten van β -verval en het zoeken naar permanente elektrische dipool momenten (EDM) in atomaire systemen.

2. β -verval en het zoeken naar een permanent EDM

Beta-verval, een manifestatie van de zwakke wisselwerking, wordt in het Standaard Model beschreven door vector en hoekvector stromen met tegengestelde tekens (V-A), die schending van pariteit en “linkshandige” structuur veroorzaken. Andere mogelijke stromen, zoals scalaire, pseudo-scalaire en tensor stromen vereisen het bestaan van nieuwe fysica. De huidige experimentele limiet op deze stromen zijn niet heel erg strikt en verbetering is nodig om de fundamenteen van beta-verval te onderzoeken. De door de TRI μ P groep geplande experimenten [Jun05A, Wil05] behelzen hoek- en energiecorrelatie metingen tussen beta-deeltje en neutrino, waarbij gebruik wordt gemaakt van kortlevende alkali en aardalkali elementen, zoals ^{21}Na .

Een permanent EDM van een elementair deeltje schendt zowel Pariteits-(P) als Tijdsomkerings-symmetrie (T) [Lan57] en met aanname van het CPT theorema wordt CP-symmetrie ook geschonden. CP schending is in het Standaard Model ingebouwd door een enkele complexe fase in de Cabibbo-Kobayashi-Maskawa matrix [Khr97]. Dit leidt tot extreem kleine waarden voor de elektrische dipool momenten, die, voor alle deeltjes binnen het Standaard Model, verschillende ordegroottes onder de huidige experimentele limieten liggen. Vele speculatieve modellen staan grotere EDM waarden toe, zodat deze modellen getest kunnen worden met precieze EDM metingen [Dam05, Jun05A, Wil05]. De TRI μ P groep richt zich voornamelijk op radium isotopen, en onderzoekt de mogelijkheden voor lichte ionen, zoals ^1H , ^2H , en ^3He [Ond05].

Bij β -verval kunnen correlaties tussen het β deeltje en het teruggestoten ion informatie verschaffen over de impuls van het neutrino, dat moeilijk direct te meten is. In een medium kunnen zulke metingen niet met voldoende nauwkeurigheid gedaan worden door wisselwerkingen met het medium. Experimenten waarbij naar permanente Elektrische Dipool Momenten wordt gezocht, zijn gebaseerd op observaties, met hoge gevoeligheid, van de precessie van de spin van een deeltje in een elektrisch veld, hetgeen eveneens niet in een medium gedaan kan worden.

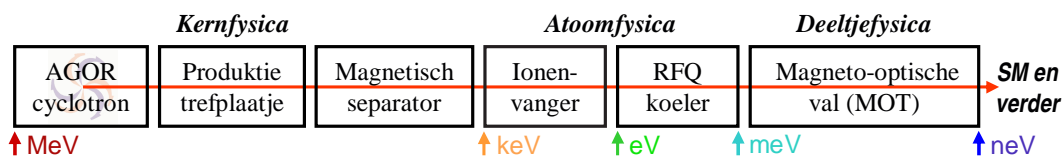


FIG. 1: *Schematische weergave van de experimentele opstelling van de TRIUMF faciliteit.*

Een manier om beïnvloeding door een substraat uit te sluiten is het geproduceerde monster te vangen in een val, zoals een magneto-optische val (MOT). Verdere voordelen van magneto-optische vallen zijn: de productie van monsters met zeer lage temperaturen en goede ruimtelijke lokalisatie, reductie van achtergrondstraling en de mogelijkheid isotopen exclusief te selecteren.

Om de gewenste radioactieve isotopen in de val te brengen moeten verschillende stappen genomen worden. Ze moeten worden geproduceerd, gescheiden, afgeremd, gekoeld, en gevangen als neutrale atomen. Deze serie behelst een grote diversiteit aan experimentele technieken. De efficiëntie en snelheid van elke stap zijn zeer belangrijk, in het bijzonder wanneer kortlevende isotopen gebruikt worden.

3. Naar precisie-experimenten in vallen

De doelstellingen van de TRIUMF groep, gebruikmakend van precisie metingen, vereiste het bouwen van een faciliteit die radioactieve nucleïden kan leveren met voldoende aantallen en puurheid. De opbouw van de faciliteit (zie Fig. 1) en de functie van de belangrijkste onderdelen is hieronder gegeven samen met een uitleg over het werk dat is gedaan aan het ontwerpen, bouwen, berekenen, en het ingebruiknemen van deze onderdelen. Dit proefschrift omvat het werk dat is gedaan aan isotopen-productie en -scheiding (“target” en separator), aan het stoppen van de ionen en bundelvorming (ion catcher), en aan het koelen en groeperen van de ionenbundel (radiofrequentie quadrupolen).

Productie en scheiding van radioactieve isotopen

De gezochte radioactieve nucleïden worden in verschillende kernreacties geproduceerd met “omgekeerde kinematiek”, waarbij gebruik wordt gemaakt van zware-ionen-bundels van het AGOR supergeleidend cyclotron op het Kernfysisch Versneller Instituut (KVI) [Bra01]. De bundel wordt gefocusseerd op het productie-trefplaatje stroomopwaarts van de magnetische separator (Fig. 1). De separator is ontworpen om de producten te scheiden van de primaire bundel en

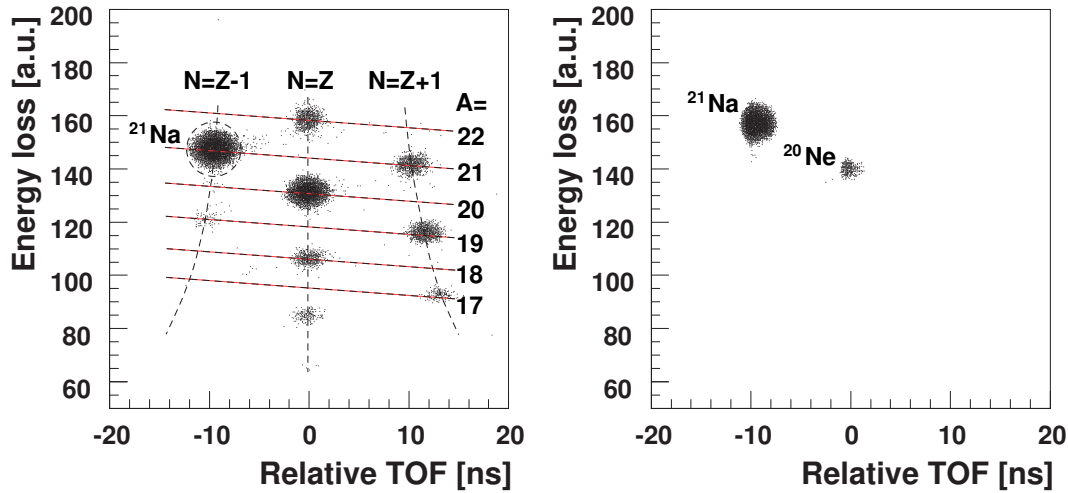


FIG. 2: ΔE - TOF spectra verkregen met detectoren in het focaalvlak van de separator. De linker grafiek is een voorbeeld van magnetische rigiditeitsselectie. De rechter grafiek is met degrader selectie toegevoegd.

tevens de gewenste isotopen te scheiden van andere producten. De separator heeft twee instellingen: de “fragmentatie” toestand en de “gas-gevulde” toestand. Eerstgenoemde wordt gebruikt voor bundel energieën boven ~ 10 MeV/u, terwijl de laatstgenoemde bedoeld is voor energieën onder ~ 10 MeV/u, waar fusie-evaporatie reacties de boventoon voeren.

De separator is operationeel gemaakt [Ber06] en verscheidene reactiemechanismen zijn gebruikt voor de productie van natriumisotopen (^{20}Na en ^{21}Na). Dit is gedaan om de optimale reactie en energie te bepalen voor de productie van ^{21}Na , een van de belangrijkste isotopen voor beta-verval studies van de TRI μ P groep.

Het gewenste product wordt gescheiden van de primaire bundel en de andere producten d.m.v. hun magnetische rigiditeit. Hoewel de primaire bundel, die een smalle impulsverdeling heeft, eenvoudig verwijderd kan worden, is het uitfilteren van andere producten niet volledig na de $B\rho$ scheiding (Fig. 2, links). Verdere zuivering (Fig. 2, rechts) kan worden bewerkstelligd door een energie “degrader” in het dispersieve vlak van de separator en een daaropvolgende tweede rigiditeitsselectie. De degrader selectie is gebaseerd op de ladingsafhankelijke differentiële afremming in materialen.

De maximale productieopbrengst van ^{21}Na werd verkregen met een (d,n) reactie. Deze was $\sim 1.3 \cdot 10^4$ deeltjes/s bij een 1 pnA ^{20}Ne bundel (22.3 MeV/u) en een 6.4 mg/cm² D₂ trefplaatje.

Afremmen, Extractie, en vorming van Laag Energische Bundels

De natrium-isotopen hebben aan het einde van de separator gewoonlijk een te grote snelheid om gevangen te kunnen worden en moeten dus afgeremd worden. Dit wordt gedaan in de zogenaamde Thermal Ionizer ionenvanger. De ionen worden tot stilstand gebracht in een aantal hete wolfram folies, die zich in een verhitte holte bevinden. Na diffusie naar het oppervlak kunnen de ionen geëxtraheerd worden door een kleine opening in de holte. Door botsingen met de wanden en de folies worden de ionen verschillende keren geneutraliseerd en geïoniseerd, voordat ze als ion geëxtraheerd worden. Om de ionfractie te optimaliseren wordt de temperatuur van de holte boven ~ 2000 K gehouden, omdat zowel de waarschijnlijkheid voor ionisatie als de diffusie-snelheid omhoog gaan bij toenemende temperatuur.

De Thermal Ionizer is in gebruik genomen met een ^{20}Na bundel. Het voordeel van dit Natrium isotoop is de korte halfwaardetijd (448 ms) en de karakteristieke alpha lijnen die op het betaverval volgen (zie Fig. 3). De uit de Thermal Ionizer geëxtraheerde isotopen zijn tot 9.5 keV versneld en vervolgens gestopt in een dun aluminium folie, vlak voor een detector waar ze vervolgens vervallen. Hierdoor zullen alleen de alpha-deeltjes de detector bereiken. Een gedeelte van de energie die vrijkomt in het verval zal hierbij verloren gaan. Dit maakt het mogelijk om deze alpha's te onderscheiden van die afkomstig van direct in de detector geïmplanteerde ^{20}Na ionen. Dit geeft aanleiding tot een verschuiving van de gemeten alpha energien (zie Fig. 3).

Bij een temperatuur van 2300 K zijn voor ^{20}Na transmissie efficiënties gehaald van $\sim 2.3\%$. Voor ^{21}Na wordt een efficiëntie rond de 16% verwacht, vanwege de langere levensduur (22.5 s). Naar verwachting kunnen in toekomstige experimenten hogere temperaturen bereikt worden, en dus hogere efficiënties.

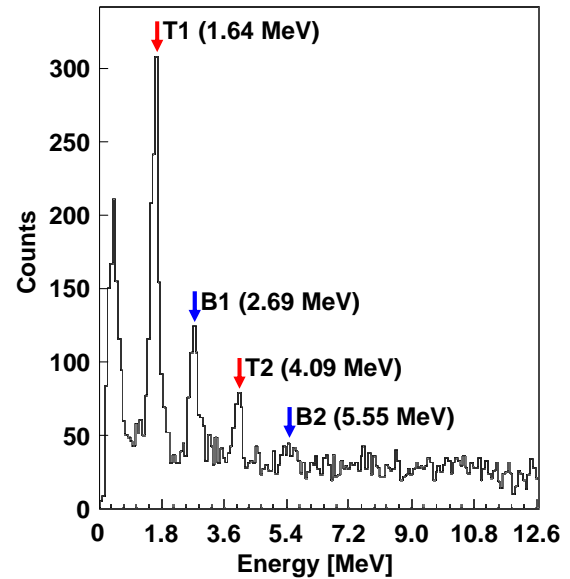


FIG. 3: Karakteristieke alpha lijnen bij het β -verval van ^{20}Na . De lijnen B1 en B2 corresponderen met implantatie van ^{20}Na in de detector. De lijnen T1 en T2 zijn van ^{20}Na ionen afkomstig van de Thermal Ionizer.

Ionen Koeling en Bundeling

De emittantie van de Thermal Ionizer bundel is groot en koeling is daarom noodzakelijk. Hiervoor is na de TI een radio-frequentie quadrupool (RFQ) geïnstalleerd. Naast de koeling bundelt deze RFQ de ionen tot korte pulsen.

Er is een prototype RFQ koeler gebouwd om een baanbrekend nieuw concept te testen, gebaseerd op het capacitief koppelen van de radio-frequent golven. De meet resultaten aan het prototype komen overeen met berekeningen.

Het ontwerp van de TRI μ P RFQ is meegenomen in simulatie voor de bepaling van verliezen ten gevolge van randvelden en om de eigenschappen van het systeem te bestuderen. De simulatie-resultaten stemmen overeen met de kwalitatieve verspellingen, maar overschatten de transmissie van het systeem.

Het operationeel maken van de RFQ is gedaan met stabiele Na isotopen. De verschillende gasdrukken, waarbij de koeler en buncher werken, worden bepaald door differentieel pompen. Een aantal metingen zijn uitgevoerd om het koelvermogen van het koeler gedeelte en de ionen opslag capaciteit van het buncher gedeelte te bestuderen (zie Fig. 4). De laatste bleek sterk af te hangen van de mate van verontreiniging van het systeem. Voor zowel het koeler als het buncher gedeelte worden momenteel transmissies gehaald van 55–60%. Dit is laag in vergelijking tot de simulaties, hetgeen verklaard kan worden door de invloed van randvelden in de nabijheid van de extractieapertuur, en door de toenemende rol van diffusie bij het gebruik van lichte ionen.

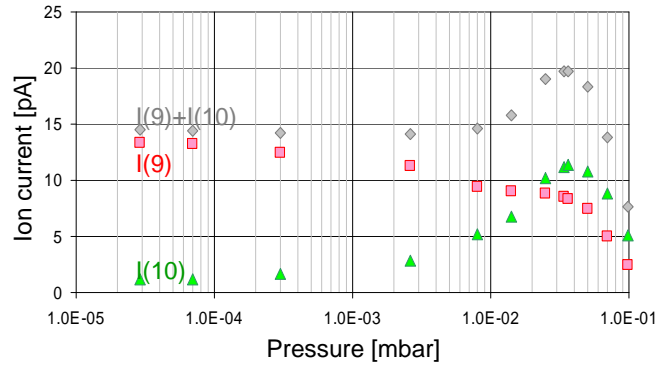


FIG. 4: *Gemeten ionen stroom op de as (Δ) en terzijde (\square) als functie van de gas druk in de RFQ.*

Atomaire vallen en correlatie metingen in beta verval

In atoomvallen kunnen correlatie metingen tussen β -deeltjes en de restkern gedaan worden. Door impuls en energie behoud kan de complete vervalskinematic gereconstrueerd worden. De opzet van het β -verval experiment van TRI μ P zal bestaan uit twee aangesloten MOT systemen: de “verzamel” MOT [Rog05] en de “verval” MOT [Soh05, Soh06]. De verzamelval wordt gebruikt om te neutraliseren,

verzamelen en koelen van de ^{21}Na ionen en de vervalsval wordt gebruikt om de werkelijke metingen te maken, en zal de detectoren voor de β deeltjes en de ^{21}Ne ionen bevatten.

4. Conclusies

De TRI μ P separator kan gebruikt worden voor "in-flight" productie en scheiding van een grote verscheidenheid aan radioactieve kernen. Bundels worden geleverd met energien in de orde van enkele MeV per nucleon en zijn al met succes gebruikt voor experimenten door gebruikers, bijvoorbeeld voor het meten van β - γ "branching ratios" in ^{21}Na [Ach05] en voor het bestuderen van het drievoudige α verval van gexciteerde toestanden van ^{12}C - een experiment dat zeer belangrijk is voor het onderzoeken van de vorming van elementen in sterren [Ped06]. Afhankelijk van de experimentele vereisten kan de bundel geoptimaliseerd worden ofwel naar elementaire puurheid of naar maximale productiesnelheid.

Voor experimenten bij lagere energien zijn gekoelde en "gegroepeerde" bundels beschikbaar. Laagenergetische bundels zullen gebruikt worden in de β -verval en EDM experimenten, die gaande zijn [De, Mol, Soh]. De huidige productiesnelheden lijken voldoende te zijn voor de eerste gedeelten van deze experimenten. De productiesnelheden zullen verhoogd worden door optimalisatie van de onderdelen van de faciliteit en door de op handen zijnde verbeteringen van het cyclotron naar kW bundels.

